

林振敏,黄荣,戚云枫,等. 广西对流尺度数值天气预报模式系统建设与效益评估[J]. 气象研究与应用,2022,43(2):105–110.

Lin Zhenmin,Huang Rong,Qi Yunfeng,et al. Construction and benefit evaluation of convective scale numerical weather prediction model system in Guangxi[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2022,43(2):105–110.

广西对流尺度数值天气预报模式系统建设与效益评估

林振敏,黄 荣,戚云枫,曾小团

(广西壮族自治区气象台, 南宁 530022)

摘要: 广西现运行的对流尺度数值天气预报模式系统基于华南短临预报模式 CMA-GD(R1)经本地化开发建立。介绍了该模式系统所采用的新技术:包括三维静力参考大气、迭代式 SISL 方案、多进程并行 I/O、并行 Nudging 同化等,分析了业务运行情况及模式预报初步检验结果。应用实践证明,模式系统可以高效稳定运行,提供了逐 12min 更新、预报时效为 6h 的模式预报产品,为强天气短时临近预报提供参考。

关键词: 对流尺度;数值天气预报模式;三维静力参考大气;迭代式 SISL 方案;短时临近预报

中图分类号: P456

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.2.18

引言

广西地处低纬地区,北依南岭山脉,西有云贵高原,南部临海,境内地形复杂,河流纵横,水汽充沛,太阳辐射强烈,有利于强对流的发生发展^[1]。强对流天气是造成气象灾害的主要原因之一,强对流天气具有发生突然、移动迅速、天气剧烈、破坏力强等特点。强对流天气由中小尺度对流系统产生,中小尺度对流系统具有发展演变快(生命期从几分钟至几小时)、空间尺度小(几十米至几百千米)等特点。因而,对强对流天气的监测和预警预报在短时临近天气预报业务中一直是一个难点。针对强对流天气的短时临近预报,各气象部门发展了基于雷达回波与卫星图像的简单外推的短时临近天气预报技术^[2-5]。业务应用表明,基于外推的短时临近预报在 0~1h 的预报中相当有效,在 3h 后预报效果不好^[6]。这是因为强对流天气具有非线性特点,它非线性地快速发生、发展和消亡。基于外推的短时临近预报预报技术,可以很好地描述“线性”发展的系统,但对于“非线性”发展的系统则不能很好地描述。另外,用人工智能的方法来进行强对流天气的短时临近预报,也有了许多的尝试^[7-9],但由于缺乏足够的样本,基于

人工智能的临近预报方法还处在发展当中^[10]。高分辨数值天气预报模式具有对强对流天气系统“非线性”发展变化的潜在预报能力,对强对流系统活动的预报在原理上远优于简单的外推方法。基于对流尺度数值天气预报模式的短时临近预报业务越来越受重视^[11-12],美国正在发展更高时空分辨率、同化更多非常规资料的高分辨率快速更新循环数值预报系统 HRRR(High-Resolution Rapid Refresh)来直接预报强对流天气^[13-14]。广东省气象局发展了华南短时数值天气预报模式^[15-16],将先进的外推预报方法同快速更新循环的高时空分辨率数值模式预报进行融合,是未来强对流天气短时临近预报的重要发展方向^[2,17]。

气象防灾减灾、社会活动保障及无缝隙精细化网格天气预报业务都对精细化的短时临近预报业务提出了更高的要求。中国气象局《短时临近预报预警服务业务能力提升工作方案》提出,“发展短时强降水、雷雨(暴)大风、冰雹等临近预报业务,建立高频滚动的分钟级降水临近预报业务,更新频次达到 10min,分辨率精细到 1km”。开展精细化的网格短临预报需要高频更新的高时空分辨率的初始场。

目前广西对强对流天气的短时临近预报,主要

收稿日期: 2022-05-12

基金项目: 广西自然科学基金项目(2022GXNSFAA035482)、泛珠三角科技创新开放基金项目(FZSJ202108)、广西气象科研计划项目(桂气科 2022ZL01)

作者简介: 林振敏(1970—),男,高级工程师,主要从事数值模式研究和应用工作。E-mail: gxnnzml@163.com

采用基于雷达产品的传统的外推方法,外推技术预报时效较短,准确率满足不了需求,而且无法预报对流的发生、发展和消亡,1h以后准确率快速降低^[18-22]。因此,广西壮族自治区气象局联合广东省气象局建立了用于广西短时临近天气预报业务的分钟级快速更新同化的对流尺度值天气预报模式系统,该系统可提供水平分辨率约1km,逐12min更新,逐12min输出的模式产品,提供给短时临近预报业务参考。

1 模式系统概况

广西现运行的对流尺度数值天气预报模式系统基于华南短临预报模式CMA-GD(R1)(框架为我国自主研发的GRAPES模式,Global/Regional Assimilation and Prediction System),由广西气象局和中国气象局/广东省区域数值天气预报重点实验室经本地化开发建立,模式水平分辨率约1km,计算区域102°E~114°E;18°N~28°N(简称广西区域)。模式系统在国家超算广州中心天河2号高性能计算机集群上运行,逐12min启动,快速更新同化模式范围内雷达等观测资料,作未来6h逐12min预报;模式每次运行时间不超过12min;每12min输出一次模式产品,包括降水、组合雷达反射率、2m温度、风等地面要素的数据和图形产品;模式输出产品通过专线传输到广西气象局。

2 模式技术特点

在我国自主研发的GRAPES模式基础上,使用三维静力参考大气与迭代式半隐半拉格朗日(SISL)相结合的模式动力框架、更新的物理过程方案、多进程并行I/O、并行nudging等新技术,建立逐12min快速更新同化的对流尺度数值天气预报模式。新技术的应用,有效地提高了对流尺度级模式积分的稳定性和预报精度及模式运行效率。

2.1 模式动力框架

GRAPES模式是我国自主研发的新一代全球/区域多尺度统一的同化与数值预报系统,GRAPES模式动力框架的主要特点为:全可压-非静力平衡、半隐式-半拉格朗日(SISL)时间差分方案、静力参考大气、高度地形追随坐标、垂直方向采用Charney-Philip跳层设置、水平等距经-纬网格和Arakawa-C跳点^[23-24]的模式。以下称我国自主研发的GRAPES模式系统为“原GRAPES模式”。

对流尺度数值天气预报模式系统在原GRAPES

模式的基础上,采用三维静力参考大气和改造优化的迭代式半隐半拉格朗日SISL方案相结合的模式动力框架。

2.1.1 三维静力参考大气

在模式方程中引入参考大气,将模式的预报变量分解为基本状态部分(平均量)和扰动(偏差)部分,可以有效消除垂直运动方程中满足静力平衡的分量,有效地提高垂直运动方程的计算精度。同时根据平均量与其偏差的大小关系,对模式预报方程进行线性化处理,方便对模式方程进行隐式求解^[20]。参考大气越接近实际大气,则其扰动较小,越有利于模式预报精度的提高。原GRAPES模式采用一维静力参考大气(即参考大气满足静力关系,参考大气仅是高度的函数),由于扰动量在不同地区的大小可能差别很大,容易导致大的计算误差;此外,在对模式方程分解线性项和非线性项时,当非线性项不是小项时,将会降低模式积分稳定性和计算精度^[25]。引入三维参考大气(考虑参考大气的水平变化)方案并进行优化,可大大减小初始扰动量,减少模式积分误差,有效地提高模式积分的稳定性和预报精度^[15-16,25-29]。

2.1.2 优化改进的迭代式SISL方案

半隐式-半拉格朗日(SISL)时间差分方案是绝对稳定的,理论上可以取很长的时间步长,可大大提高时间差分方案的计算效率,而且具有良好的频散特性^[20]。使用半隐式半拉格朗日时间差分方案,对于提高非静力模式的计算稳定性和计算精度来说都是较为适当的选择^[25]。

原GRAPES采用的是二时间层SISL时间积分方案,容易产生由于时间外插造成的模式积分不稳定问题^[28]。为减少时间外插的影响,提高模式的计算精度和稳定性,对原GRAPES的SISL方案从以下几个方面进行改进:1)非线性项分步计算,通过预估校正提高非线性项计算精度;2)拉格朗日平流校正;3)改进模式快慢物理过程调用次序;4)物理过程与动力过程耦合,形成优化改进的迭代式SISL方案^[15-16,25-28]。

2.2 模式物理过程

模式的物理过程主要有两类。一类是大气中的过程,如长短波辐射、云物理、深对流、浅对流等过程;另一种是对大气运动有重要影响的下垫面过程,如海陆面过程、边界层和地形效应参数化等。

对流尺度模式使用的长短波辐射由原来的

RRTM 方案升级为 RRTMG 方案,RRTMG 方案可明显缓解原 RRTM 方案高层过度降温的问题;边界层参数化方案采用 NMRF 方案;陆面过程采用 SMS 方案,并增加陆面分析以提高陆面预报精度^[15]。云物理使用更新的云微物理 WSM6 方案,降水全部由微物理(WSM6)产生,去掉深对流和浅对流的参数化过程^[15-16,30]。地形参数化使用次网格地形重力波拖曳(简称 GWDO)参数化方案^[31-32]。

2.3 多进程并行 I/O 技术

模式在国家超算广州中心天河二号上实时运行,随着进程的增加,I/O 占比越来越大,极大地影响模式运行效率。为了突破模式 I/O 瓶颈,针对天河二号计算机的架构,开发了多进程并行 I/O 算法(MPHIO),从输入、输出、迭代中的通信等方面对 I/O 进行优化^[33]。采用 MPHIO 的输出方式,一个文件的输出所需要的时间由优化前的 14s 缩短到优化后的约 0.2s,极大地提高了 I/O 效率。通过优化,模式可以在 12min 内完成所有的计算,满足模式逐 12min 快速更新启动的要求。

2.4 并行 Nudging 同化技术

实时快速同化观测资料,是提高数值天气预报模式的预报能力的重要途径。对流尺度模式逐 12min 间快速更新,需要及时同化最新雷达等观测资料。为提高快速同化能力,开发并行 Nudging 同化技术,通过并行计算,快速 Nudging 同化雷达等观测资料,迅速改进模式初始水物质等分布情况,提高模式的预报能力^[16]。

3 模式系统业务运行

模式系统于 2021 年 7 月 31 日正式投入业务运行,模式系统在国家超算广州中心天河 2 号高性能计算上运行,逐 12min 启动;快速更新同化(纳近方法等)模式范围内雷达等观测资料;作未来 6h 逐 12min 预报;模式输出产品通过专线传输到广西气象局。

3.1 模式系统运行平台

模式系统在国家超算广州中心天河 2 号高性能计算机集群独立的计算分区上运行,独立分区上计算资源为不低于 7920 个的物理核心(330 个节点,每节点 24 个核心和 64GB 内存)及 139TFlops 的算力,以此保证模式运行时间不超过 12min。独立分区提供 10TB 的存储空间,供模式实时计算使用及临

时存储模式输出产品。

3.2 模式系统输出产品

模式逐 12min 启动(每天共计 120 次),预报时长 6h,逐 12min 输出,预报要素包括雷达组合反射率、降水、2m 温度、地面温度、2m 相对湿度、海平面气压、地面气压、10mU 和 V 风等 9 种。模式直接输出数据为二进制格点数据文件。由于模式直接输出文件所占的存储空间比较大,将其转为 grib2 格式文件。同时,为方便使用者快速浏览模式预报产品,基于模式直接输出数据,实时生成 GIF 图形产品。

grib2 格式文件的文件名为:Z_NAFP_C_BCGX_YYYYMMDDHHmmss_P_LARP-GXR1KM-ffff.BIN,其中 Z_NAFP_C_为固定代码,BCGX 代表广西,LARP 代表区域数值天气预报重点实验室,YYYYMMDDHHmmss 代表起报时间(年月日时分秒),GXR1KM 代表对流尺度数值天气预报系统,FFF 代表预报时效(FFF 为分钟,分别为 000,012,024,……,360)。

3.3 模式数据传输

模式系统每次启动生成数据约为 330M,每天 120 次,每天数据量将近 40G 的数据,每个月数据量 1200GB 约 1.2TB。模式产品在国家超算广州中心生成,为及时快速将模式生成产品传输到广西气象局,在国家超算广州中心与广西气象数据中心建设“点对点”网络专线带宽为 500Mbps,以 MSTP 方式接入。

通过专线传输,在国家超算广州中心实时生成的模式产品 1min 内即可传输到广西气象数据中心服务器上。

4 模式预报效果

模式系统自投入业务运行以来,所提供的预报产品为短时临近天气预报业务提供了参考。为了解模式预报性能,更好地为预报业务服务,对模式预报产品进行评分,结果表明:

模式晴雨预报准确率较高,预报偏差随时间段加长而增大。对逐 1h、3h、6h 3 个不同预报时段晴雨检验指标计算显示(表 1),逐 1h 预报准确率最高,达 76.9%,随预报时段增长而降低;TS 则相反,最高为逐 6h 预报,达 35.48%;预报偏差逐 1h 预报最小,为 0.27。小时预报表现为时效越近评分越高(表 2),TS 和准确率均为第 1h 预报最高,偏差也最小。

表 1 2021 年 8 月—2022 年 2 月不同预报时段晴雨检验指标

	TS(%)	准确率 (%)	降水偏差
逐 1h	24.45	76.99	0.27
逐 3h	30.24	71.10	0.36
逐 6h	35.48	67.09	0.44

表 2 2021 年 8 月—2022 年 2 月小时预报不同时段晴雨检验指标

	第 1 小时	第 2 小时	第 3 小时	第 4 小时	第 5 小时	第 6 小时
TS (%)	14.96	14.60	13.53	13.26	13.45	13.89
准确率 (%)	73.57	71.23	71.18	70.65	69.74	69.77
降水偏差	0.27	0.32	0.32	0.32	0.33	0.33

下面是模式对一些个例的预报情况：

个例一：2021 年 9 月 1 日南宁局地强降雨过程。9 月 1 日 02—09 时，南宁市大部出现阵雨，南宁城区局地暴雨到大暴雨。大暴雨出现在南宁西乡塘区及兴宁区，造成严重内涝。这次过程模式可以提前 6h 预报出初生对流，且对对流发展演变趋势的预报与实况基本一致。

个例二：2021 年 8 月 16 日受低层偏南气流影响，桂东观测的组合反射率回波范围小，2021 年 8 月 16 日 08 时模式起报预报 6h 后桂东有大范围回波，与实况对比，空报明显。

个例三：2021 年 9 月 23 日受飚线影响，桂东、桂南出现大范围强对流天气。模式预报的 4—6h 的 1h 累积雨量相比于实况范围和量级偏小。模式预报的大风位置和移动趋势与实况比较接近，但量级偏小。

通过对以上个例的分析及 2021 年 7 月以来更多模式的预报个例进行分析统计，可以发现：

模式能提前 4~6h 预报出新生对流发展演变趋势，对局地降水有较好的指示意义，特别在强影响天气系统背景下，预报效果更为显著（个例 1），但降水的范围、位置和强度有不同程度的偏差，有一定程度的空报和漏报（个例 3）。

模式对回波和降水的移动及发展趋势 1~6h 预报可参考性较大。降水回波的趋势和强度预报在所检验过程中表现较好，回波强度相对稳定，但降水强度通常相对实况有偏差，位置也有一定偏差。比较分散的弱回波通常不太可信，需要特别关注 40dBz 以上的强度回波和移动趋势（个例 2）。

模式对 10m 风的预报风速普遍比实况小，雷暴大风或者飚线大风的量级偏少较多（个例 3）。

5 结论与问题

基于我国自主研发的 GRAPES 模式，并使用多项新技术建立的对流尺度数值模式天气预报系统，可以高频启动，高效地稳定运行，提供逐 12min 更新、预报时效为 6h（输出间隔为 12min）的模式预报产品。

模式对新生对流发展演变趋势、回波和降水的移动及发展趋势的预报均有较大的参考价值。模式对降水的范围、位置和强度的预报都有不同程度的偏差，有一定程度的空报和漏报。模式对 10m 风速、雷暴大风或者飚线大风的量级都有较大的偏差。针对模式预报存在的问题，需要进一步开展模式产品的检验评估，不断完善模式预报系统，提高模式系统预报性能，更好地为短时临近天气业务提供高质量的数值模式预报产品。

参考文献：

[1] 《广西天气预报技术和方法》编写组.广西天气预报技术和方法[M].北京：气象出版社，2012.

[2] 郑永光，张小玲，周庆亮，等.强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J].气象，2010，36(7)：33-42.

[3] 陈明轩，王迎春，俞小鼎.交叉相关外推算法的改进及其在对流临近预报中的应用[J].应用气象学报，2007，18(5)：690-701.

[4] 韩雷，王洪庆，林隐静.光流法在强对流天气临近预报中的应用[J].北京大学学报(自然科学版)，2008，44(5)：751-755.

[5] 曹春燕，陈元昭，刘东华，等.光流法及其在临近预报中的应用[J].气象学报，2015，73(3)：471-480.

[6] 胡胜，罗聪，黄晓梅，等.基于雷达外推和中尺度数值模式的定量降水预报的对比分析[J].气象，2012，38(3)：

- 274–280.
- [7] 顾建峰,周国兵,刘伯骏,等.人工智能技术在重庆临近预报业务中的初步研究与应用[J].气象,2020,46(10):1286–1296.
- [8] 陈元昭,林良勋,王蕊,等.基于生成对抗网络 GAN 的人工智能临近预报方法研究[J].大气科学学报,2019,42(2):311–320.
- [9] 黄启桥,麦雄发,李玲,等.基于 ConvLSTM 的广西短临降水预报[J].气象研究与应用,2021,42(4):44–49.
- [10] 陈元昭,兰红平,刘琨.深圳市气象局临近预报技术进展[J].气象科技进展,2019,9(3):100–107.
- [11] 王德立,黄辉军,陈训来,等.深圳对流尺度集合预报系统对台风降水预报的检验评估[J].热带气象学报,2020,36(6):759–771.
- [12] 江崑,陈训来,朱江山,等.深圳对流尺度集合预报系统在华南暴雨中的应用研究[J].气象科技进展,2019,9(3):124–131.
- [13] Benjamin S G, Smirnova T G, Weygandt S S, et al. The HRRR Storm-Resolving, Radar-Initialized, Hourly Updated Forecasts for Air Traffic Management[R]. Arizona: Phoenix Convention Center, 2009.
- [14] Benjamin S G, Hu M, Weygandt S, et al. Integrated Assimilation of Radar/Sat/MFTAR Cloud Data For initial Hydrometeor/Divergence to Improve Hourly Updated Short-Range Forecasts from RUC/RR/HRRR[R]. Whistler, 2009.
- [15] 陈子通,徐道生,戴光丰,等.热带高分辨模式(TRAMS-V3.0)技术方案及其系统预报性能[J].热带气象学报,2020,36(4):444–454.
- [16] Chen Z T, Dai G F, Wu K X, et al. Development of 1km-Scale Operational Model in South China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2021, 27(4):319–329.
- [17] 郑永光,林隐静,朱文剑,等.强对流天气综合监测业务系统建设[J].气象,2013,39(2):234–240.
- [18] 农孟松,黄荣,黄明策,等.广西强对流天气业务与研究进展[J].气象研究与应用,2020,41(4):28–33.
- [19] 曾小团,梁巧倩,农孟松,等.交叉相关算法在强对流天气临近预报中的应用[J].气象,2010,36(1):31–40.
- [20] 颜琼丹,苏洵,韦庆华,等.一种基于多种资料融合技术的短时临近预报方法[J].气象研究与应用,2010,31(4):49–52.
- [21] 钟常鸣.雷达回波在暴雨临近预报中的应用[J].气象研究与应用,2008(S1):17–18.
- [22] 钟常鸣.利用雷达回波资料作临近预报应注意的几个问题[J].气象研究与应用,2008(S12):62–63.
- [23] 陈德辉,薛纪善,杨学胜,等. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究[J].中国科学,2008,53(20):2396–2407.
- [24] 陈德辉,沈学顺.新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展[J].应用气象学报,2006,17(6):773–777.
- [25] 陈子通,戴光丰,钟水新,等.中国南海台风模式(TRAMS-v2.0)技术特点及其预报性能[J].热带气象学报,2016,32(6):831–840.
- [26] 陈子通,戴光丰,罗秋红,等.模式动力过程与物理过程耦合及其对台风预报的影响研究[J].热带气象学报,2016,32(1):1–8.
- [27] 徐道生,陈子通,张艳霞,等.南海台风模式 TRAMS3.0 的技术更新和评估结果[J].气象,2020,46(11):1474–1484.
- [28] 苏勇,沈学顺,陈子通,等. GRAPES.GFS 中三维参考大气的研究:理论设计和理想试验[J].气象学报,2018,76(2):241–254.
- [29] 杨兆礼,陈子通.区域模式参考大气扰动量算法的预报试验[J].热带气象学报,2014,30(6):1107–1112.
- [30] 马占山,刘奇俊,孙健,等.WSM6 云微物理方案对华北地区一次降雪预报偏强的原因分析[J].气象,2021,47(9):1029–1046.
- [31] Kim Y J, Arakawa A. Improvement of Orographic Gravity-Wave Parameterization Using a Mesoscale gravity-Wave Model [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1995, 52:1875–1902.
- [32] Zhong S X, Chen Z T. Improved Wind and Precipitation Forecast over South China Using a Modified Orographic Drag Parameterization Scheme [J]. Journal of Meteorological Research, 2016, 22(4):522–534.
- [33] 陈璟锬,杜云飞.地球科学大规模并行应用的重叠存储优化[J].计算机研究与发展,2019,56(4):790–797.

Construction and benefit evaluation of convective scale numerical weather prediction model system in Guangxi

Lin Zhenmin, Huang Rong, Qi Yunfeng, Zeng Xiaotuan
(Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China)

Abstract: The convective-scale numerical weather prediction model system operating in Guangxi is developed and established locally based on the short-term and imminent forecasting model CMA-GD (R1) in South China. The new technologies used in the model system are introduced, including three-dimensional static reference atmosphere, iterative SISL scheme, multi process parallel I/O, and parallel Nudging assimilation. The operation situation and the preliminary test results of model prediction are analyzed. The application practice proves that the model system can run efficiently and stably, and provides a model forecast product that updates every 12 minutes and the forecast time limit is 6h, which provides a reference for the short-term approaching forecast of strong weather.

Key words: convective scale; numerical weather prediction model; three-dimensional static reference atmosphere; iterative SISL scheme; short-term nowcasting